

Результаты фотометрических измерений искусственного оптического свечения ионосферы в линиях 557,7 нм и 391.4 нм на стенде СУРА

И.Д.Ткачев¹, А.Б. Белецкий¹, И.А. Насыров², С.М. Грач³, А.В. Шиндин³

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН

г. Иркутск, 664033, Россия.

Е-mail: beletsky@mail.iszf.irk.ru

²Казанский (Приволжский) федеральный университет

г. Казань, 420008, Россия.

Е-mail: igor.nasyrov@gmail.com

³Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

г. Нижний Новгород, 603950, Россия.

Е-mail: sgrach@rf.unn.ru

В данной работе представлены результаты предварительного анализа данных экспериментальных кампаний, полученных в августе-сентябре 2023 года и мае 2024 года. В ходе экспериментов проводилась регистрация отклика ионосферы в видимом диапазоне длин волн на мощное коротковолновое излучение стенда СУРА. Оптические измерения проводилась, в том числе, с помощью инструментов ИСЗФ СО РАН, которые находились непосредственно рядом со стендом СУРА. В настоящем исследовании представлены результаты измерений быстрых вариаций интенсивности атмосферных эмиссий 557.7 нм, 630 нм и 391.4 нм, полученных с помощью трехканального фотометра. Впервые в экспериментах на стенде СУРА удалось зарегистрировать регулярное увеличение интенсивности эмиссий 391.4 нм и 557.7 нм из F-области ионосферы, индуцированное радиоизлучением стенда.

Ключевые слова: активные эксперименты, ионосфера, атмосферные эмиссии

Photometric measurements results of the ionosphere artificial optical luminescence in the 557.7 nm and 391.4 nm lines at the SURA facility

I.D. Tkachev¹, A.V. Beletsky¹, I.A. Nasyrov², S.M. Grach³, A.V. Shindin³

¹Institute of Solar-Terrestrial physics of Siberian branch of Russian academy of sciences

²Kazan Federal University

³Lobachevsky State University

Results of preliminary analysis of the experimental data obtained in August-September 2023 and May 2024 campaigns are presented. During the experiments, the ionospheric response in the visible wavelength range to the powerful high-frequency radiation of the SURA facility was recorded. A part of optical measurements was carried out, among others, with the help of ISTP SB RAS instruments, which were located directly near the SURA facility. The present study shows the results of measurements of the fast variations in atmospheric emission intensities of 557.7 nm, 630 nm and 391.4 nm obtained using a three-channel photometer. For the first time, for the experiments at the SURA facility, the increase in the intensity of the 391.4 nm and 557.7 nm emissions in the F region of the ionosphere induced by the SURA radio radiation was recorded regularly.

Keywords: active experiments, ionosphere, atmospheric emissions

Введение

Искусственное оптическое свечение (ИОС) ионосферы наблюдается в F-области под воздействием мощного электромагнитного излучения в результате следующей цепочки явлений: (1) взаимодействие волны накачки обыкновенной поляризации (O) на

частоте f_0 , меньшей критической частоты F_2 -слоя ионосферы f_0F_2 , с ионосферной плазмой приводит к генерации плазменных волн в области отражения волны накачки; (2) плазменные волны эффективно ускоряют свободные электроны; (3) электроны, приобретающие в результате ускорения необходимую энергию $E > I$, при столкновениях возбуждают определённые энергетические уровни (I - потенциал возбуждения уровня) нейтральных атомов или ионов ионосферного газа; (4) в процессе релаксации возбуждённого атома (иона) до основного состояния происходит высвечивание фотона. Эксперименты по исследованию закономерностей возбуждения ИОС на стенде СУРА проводятся с 1983 г. [1], серия экспериментов с участием зарубежных ученых проведена в 90-е гг. XX века и в нулевые годы XXI века [2,3], регулярные наблюдения проводятся с 2006 г.

В 2023-2024 году было проведено три экспериментальных кампании по регистрации свечения ионосферы, стимулированного мощным коротковолновым излучением стенда СУРА. В ходе кампаний, излучение регистрировалось с помощью ПЗС камер, расположенных в разнесённых регистрационных пунктах для изучения пространственной структуры области генерации свечения в красной линии атомарного кислорода ($\lambda=630$ нм, переход электронов с уровня $O(^1D)$ в основное состояние $O(^3P)$, потенциал возбуждения $I = 1,96$ эВ, радиативное время жизни $\tau = 107$ с), и с помощью фотометров в линии $\lambda=630$ нм, в зеленой линии атомарного кислорода ($\lambda = 557,7$ нм, переход с уровня $O(^1S)$ на уровень $O(^1D)$, $I = 4,17$ эВ, $\tau = 0,7$ с) и в синей линии иона молекулярного азота (первая отрицательная система $1 N_2^+$, $\lambda = 391,4$ нм, 427,8 нм, 470,9 нм и т. д., $I \sim 19$ эВ, $\tau = 10^{-6}$ с).. Возбуждение свечения в синей линии происходит одновременно с ионизацией молекулы N_2 (потенциал ионизации $I_{\text{ion}}=15,6$ эВ). Отметим, что вероятность перехода молекулы в состояние именно $B^2\Sigma_2^+$, переход с которого на нижележащие уровни соответствует системе полос $1NGN_2^+$, оказывается значительно ниже, чем полная вероятность ионизации, и излучение одного кванта $\lambda=391,4$ нм приходится в среднем на 50 актов ионизации молекулы N_2 .

В предыдущих экспериментах, начиная с 1990 г., на стенде СУРА искусственное оптическое свечения (ИОС) в линии эмиссии атомарного кислорода 630 нм наблюдалось достаточно регулярно [2-4,6,7], тогда как ИОС в зеленой линии наблюдалось в единичных случаях [2,5,7], а в синей линии не наблюдалось вовсе. В экспериментах на нагревных стендах EISCAT и HAARP свечение в зеленой и синей линиях наблюдалось достаточно регулярно [8]. В настоящей работе мы представляем результаты экспериментов 2023 г. и 2024 г. на стенде СУРА, полученные с помощью трехканального фотометра, в которых свечение в линиях $\lambda=557,7$ и 391,4 нм наблюдалось регулярно.

Методика эксперимента и использованное оборудование

11-12 августа, 10-20 сентября 2023 г. и 4-10 мая 2024 г. на стенде СУРА были проведены три серии экспериментов по исследованию ИОС ионосферы, возникающего под воздействием мощной КВ радиоволны. Измерения проводятся в тёмное время суток при безоблачном небе в период, близкий к новолунию. Частота излучения стенда f_0 должна быть ниже критической частоты ионосферы f_0F_2 . Диаграмма направленности стенда в ходе экспериментов обычно направлена вертикально вверх, либо наклонена к югу в плоскости магнитного меридиана на 12° к направлению вдоль геомагнитного поля. Измерения начинались приблизительно через полтора часа после захода солнца с наступлением астрономических сумерек и продолжались при ясной погоде до падения критической частоты ионосферы ниже рабочей частоты стенда. После этого рабочая частота стенда СУРА могла перестраиваться в соответствии с ионосферными условиями (минимальная рабочая частота стенда составляет $f_{\text{min}} = 4300$ кГц). В

описанных экспериментах частота накачки мощной волны варьировалась от 6750 кГц до 4300 кГц. В ходе экспериментов стенд работал в режиме чередования квазинепрерывного (длительность посылки 2,5 мин.) и импульсного (длительность посылки 3,5 мин., длительность импульса – 20 мс, период повторения 2 с) излучения. Следует отметить, что в процессе эксперимента имели место достаточно хорошая погода и стабильные ионосферные условия: ИОС регистрировалось в течение 9 вечеров, что позволило накопить достаточно большой объем данных. Для регистрации ИОС использовались 4 ПЗС камеры, расположенные в различных регистрирующих пунктах (в том числе 2 – в непосредственной близости от стенда), и трехканальный фотометр, расположенный вблизи стенда.

Предварительные результаты

На рис. 1 представлены три панели, на которых показана зависимость изменения интенсивности линии эмиссии во времени в зависимости от воздействия мощной КВ волны на ионосферу: красная кривая - 630 нм., зеленая - 557,7 нм., синяя - 391,4 нм., розовые вертикальные прямоугольники - активная фаза работы нагревного стенда. Для наглядности, интенсивности разных линий представлены попарно, а также, предварительно было проведено удаление тренда естественного фона интенсивности линии. Как было упомянуто выше, ИОС в красной линии наблюдается достаточно регулярно, так происходило и в текущий экспериментальный день. Помимо свечения в красной линии эмиссии в нескольких циклах происходит увеличения интенсивности как в зелёной, так и синей линии эмиссии. Особенно это выражено в первых четырёх циклах нагрева представленных на рис. 1. Изменения частоты накачки для этих циклов происходило следующим образом: с 19:31 UT по 19:55 UT - $f_0 = 5335 \text{ кГц} > 4f_c$, с 19:55 UT по 20:13 UT $f_0 = 5365 \text{ кГц} > 4f_c$, с 20:19 UT по 20:37 UT $f_0 = 5395 \text{ кГц} > 4f_c$, f_c – электронная циклотронная частота.

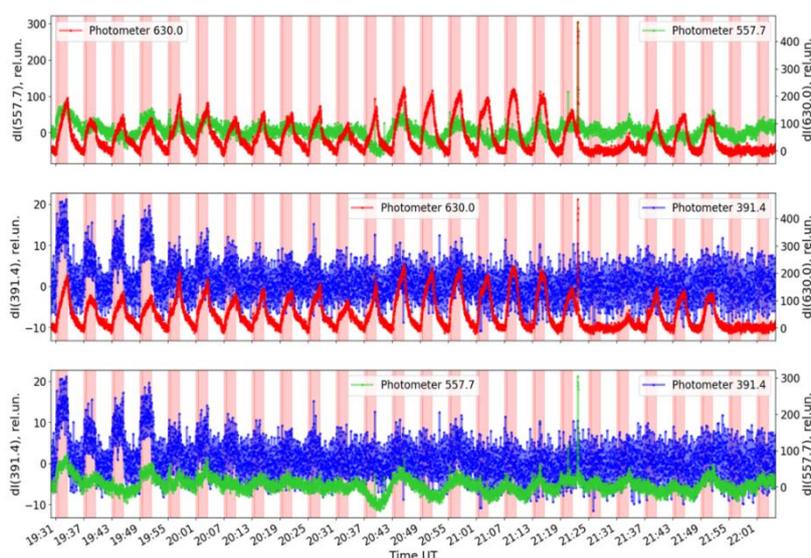


Рис. 1. Пример данных фотометров за 11.08.2023. Цветами обозначены интенсивности линии эмиссии: красный - 630 нм., зелёный - 557,7 нм., синий - 391,4 нм. Розовые вертикальные прямоугольники - время квазинепрерывного излучения нагревного стенда. Время UT

В представленных экспериментальных кампаниях удалось подтвердить наличие эффекта заметной генерации ИОС в зеленой линии атомарного кислорода во время существования экранирующего спорадического слоя Es. Этот эффект был обнаружен

на стенде СУРА в экспериментах 2021 г. [7]. На рис. 2а приведены циклы нагрева, во время которых по данным ионозонда в ионосфере развивался спорадический слой Es (рис. 2б). Данные, также как и на рис. 1. представлены за 11.08.23. Частота нагрева менялась следующим образом: до 19:07 UT - $f_0 = 5290$ кГц $< f_0 E_s$ с 19:07 UT по 19:25 UT - $f_0 = 5350$ кГц $\sim f_0 E_s$, после 19:25 UT - $f_0 = 5335$ кГц $\sim f_0 E_s$. После 19:55 UT $f_0 > f_0 E_s$. Если сравнивать интенсивности зелёной и синей линий эмиссии, представленных на рис. 1 и рис. 2., то видно, что при развитии спорадического слоя Es интенсивность синей и зелёной линии эмиссии увеличивается в несколько раз. В дальнейших исследованиях этот процесс будет изучен подробнее.

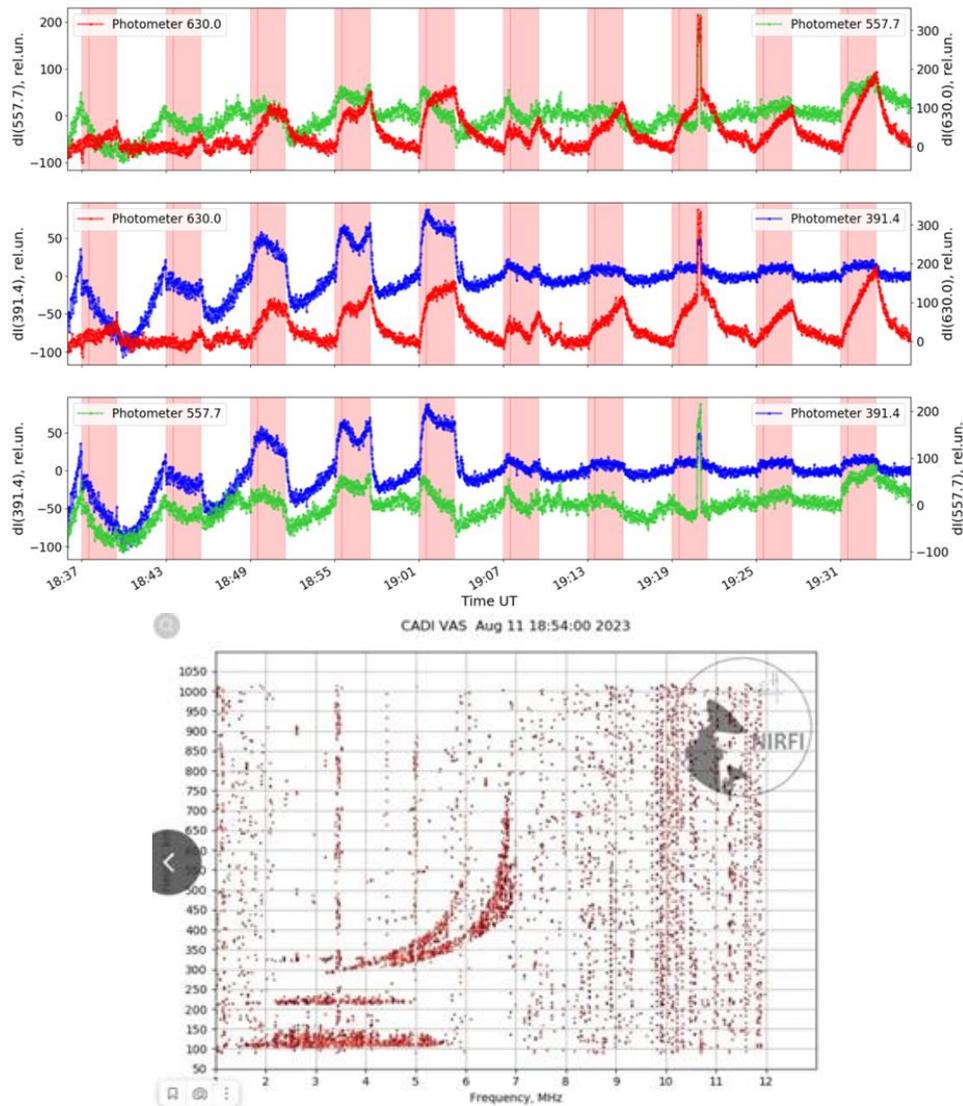
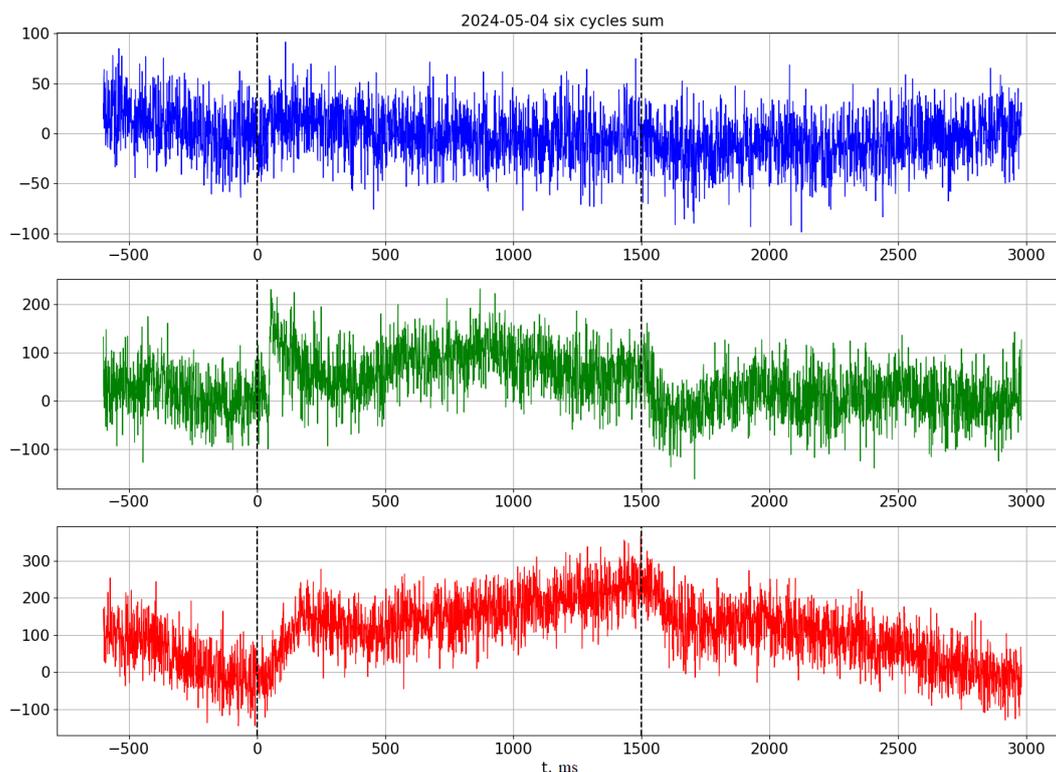


Рис. 2. Данные фотометров за 11.08.2023. а) Описание такое же, как и на рис. 1. Представлены циклы нагревов, во время которых наблюдалось развитие спорадического Es слоя. б) Ионограмма с ионозонда CADI за 11.08.23. Время UT

Возможными причинами наблюдения реакции зелёной и синей линии эмиссии во время воздействия мощной КВ радиоволной в представленных экспериментальных кампаниях, авторы считают: модернизацию передающей антенны нагревного стенда СУРА, что, возможно, позволило увеличить эффективную мощность накачки; повышенную солнечную активность, так как она оказывает влияние на состояние ионосферы, а также высокочувствительное фотометрическое оборудование. Отметим,

однако, что свечение в красной и зеленой линиях наблюдалось также в случае, когда излучаемая мощность стенда была вдвое меньше максимальной по техническим причинам, что делает первую их причин маловероятной.

Во время экспериментальной кампании в мае 2024 года также наблюдалось ИОС в красной, зелёной и синей линиях эмиссии. Временное разрешение фотометра позволяет подробнее исследовать процесс отклика в оптическом диапазоне ионосферы на нагрев. Поэтому для двух дней наблюдений 04.05.24 и 06.05.24 был проведен анализ данных «методом наложенных эпох». Были выбраны 6 циклов нагрева, с 19:06 UT по 19:42 UT. Перед началом анализа, данные были усреднены по 100 мс. В каждом цикле для всех эмиссионных линий были рассчитаны тренды фонового свечения по методике, описанной в [7]. После вычитания вычисленного тренда производилось суммирование циклов между собой. Результаты для двух сессий наблюдения представлены на рис. 3. Вертикальные пунктирные линии соответствуют началам нагрева и его завершениям. На полученных изображениях видна разная скорость увеличения интенсивности ИОС, что соответствует различным радиационным временам жизни τ для возбужденных атомов и ионов. В зелёной и красной линии наблюдается синхронный провал интенсивности излучения во время нагрева, причина его в настоящее время неясна. Более подробный анализ полученных результатов будет проводиться в дальнейшем.



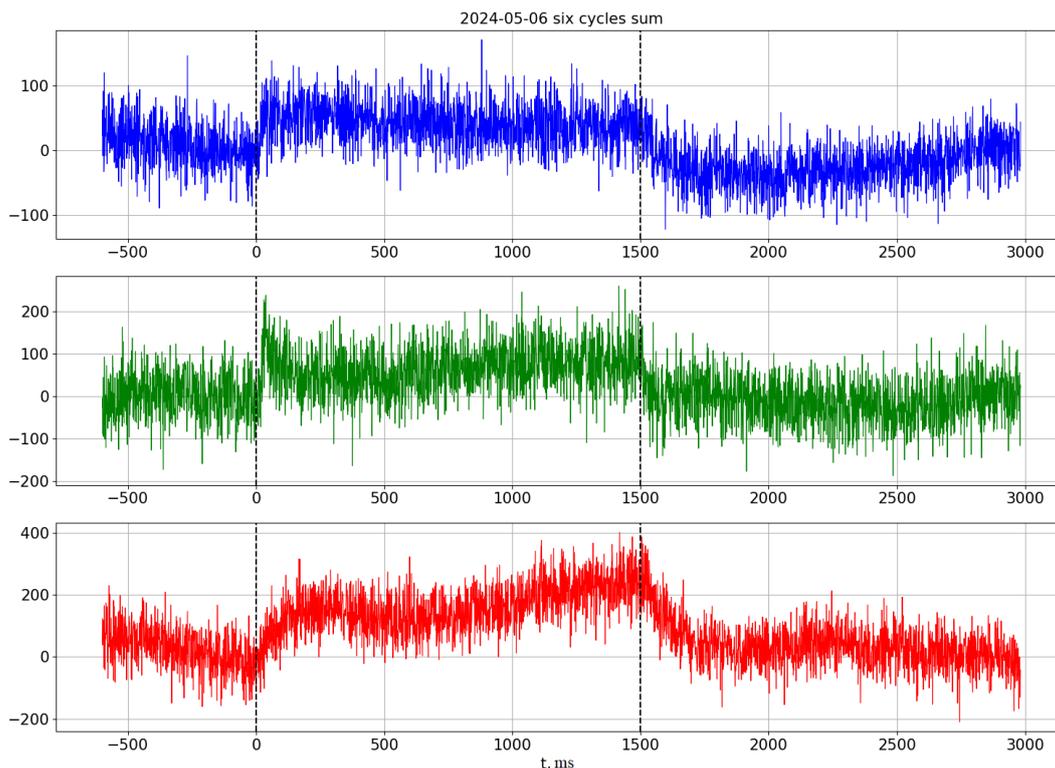


Рис. 3. “Метод наложенных эпох” для 6-ти циклов нагрева 04.05.24 и 06.05.24. Цветные кривые - линии эмиссий: красный - 630 нм., зелёный - 557,7 нм., синий - 391,4 нм.. Вертикальные пунктирные линии - момент начала нагрева и его завершения. Время в мс, отсчитывается от момента начала нагрева

Выводы

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. В отличие от экспериментов прошлых лет, в 2023 и 2024 гг., наряду с красной линией атомарного кислорода 630.0 нм (порог возбуждения 1.96 эВ), регулярно наблюдалось искусственное свечение ионосферы в зеленой линии 557.7 нм (порог возбуждения 4.19 эВ) и синей линии 391.4 нм (порог возбуждения 18.7 эВ). Свечение в линии 391.4 нм на стенде СУРА в экспериментах 2023 г. наблюдалось впервые. Слабое свечение в красной и зеленой линиях наблюдалось также в случае, когда излучаемая мощность стенда была вдвое меньше максимальной по техническим причинам, а воздействие осуществлялось в магнитный зенит.

2. В силу достаточно стабильных ионосферных условий в первые часы после захода Солнца удалось накопить большой объем данных по одновременным измерениям ИОС в красной (630,0 нм) и зеленой (557,7 нм) линиях атомарного кислорода и синей (391,4 нм) линии иона молекулярного азота при вариациях частоты мощной волны в окрестности четвертой электронной гирогармоники (5260 – 5455 кГц).

3. В экспериментах 2023 г. подтвержден эффект заметной генерации ИОС в зеленой линии атомарного кислорода во время существования экранирующего спорадического слоя Es, обнаруженный в экспериментах 2021 г. Обнаружен эффект генерации ИОС в синей линии во время существования Es, причем интенсивность ИОС при существовании Es оказывается заметно выше, чем при его отсутствии.

Экспериментальные данные получены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 20-12-00197Пс использованием аппаратуры центра коллективного пользования "Ангара" ИСЗФ СО РАН (<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>, доступен на 22 мая 2024 г.). Анализ данных выполнен при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (субсидия № 075-ГЗ/С3569/278).

Литература

1. Гумеров Р. И.; Капков В. Б.; Комраков Г. П.; Насыров А. М.; Искусственное свечение ионосферы при кратковременном воздействии мощного радиоизлучения // Известия вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 6. С. 524-527.
2. Bernhardt, P. A., W. A. Scales, S. M. Grach, A. N. Keroshtin, D. S. Kotik, and S. V. Polyakov (1991), Excitation of artificial airglow by high-power radio waves from the "SURA" ionospheric heating facility, Geophys. Res. Lett., 18, 1477.
3. Grach S.M.; Kosch M. J.; Yashnov V. A.; Sergeev E. N.; Atroschenko M. A.; Kotov P. V. On the location and structure of the artificial 630-nm airglow patch over Sura facility. Ann. Geophys. 2007, 25, 689–700. www.ann-geophys.net/25/689/2007/
4. Грач С. М., В. В. Клименко, А. В. Шиндин, И. А. Насыров, Е. Н. Сергеев, В. А. Яшнов, Н. А. Погорелко. Оптическое свечение при воздействии на ионосферу радиоизлучением стенда «СУРА»: результаты экспериментов 2010 года // Известия вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1-2. С. 36-56.
5. S.M. Grach, E.N. Sergeev, A.M. Nasyrov, R.I. Gumerov, R.R. Shaimukhametov, I.A. Nasyrov, G.P. Komrakov. Simultaneous observations of the 557.7 nm airglow and stimulated electromagnetic emission during HF pumping of the ionosphere with diagnostic schedule: first results. Advances in Space Research 34 (2004) 2422–2427.
6. С.М. Грач, Ю.К. Легостаева, В. В. Емельянов, Д.А. Когогин, И.А. Насыров, А.В. Шиндин), А.Б. Белецкий, К.К. Грехнева, В.А. Павлова, В.Р. Хашев Первые результаты трехпозиционных измерений искусственного оптического свечения в красной линии атомарного кислорода на нагревном стенде СУРА в 2021 и 2022 гг. \\ Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - Муром 2023. С. 240-247.
7. Beletsky, A.V.; Tkachev, I.D.; Nasyrov, I.A.; Grach, S.M.; Kogogin, D.A.; Shindin, A.V.; Vasilyev, R.V. Some Results of Photometric Measurements of Ionospheric Artificial Airglow at 557.7 and 630 nm Lines of Atomic Oxygen Caused by High-Frequency Radio Emission of the SURA Facility during Development of Sporadic E Layer. Atmosphere 2022, 13, 1794. <https://doi.org/10.3390/atmos13111794>
8. Gustavsson, B., T. Sergienko, M. J. Kosch, M. T. Rietveld, B. U. E. Brandstrom, T. B. Leyser, B. Isham, P. Gallop, T. Aso, M. Ejiri, T. Grydeland, A. Steen, C. LaHoz, K. Kaila, J. Jussila, and H. Holma. (2005), The electron distribution during HF pumping, a picture painted with all colors, Ann. Geophys., 23, 1747–1754.